

Совершенствование средств и методов лазерной спутниковой дальнометрии

© И. Ю. Игнатенко¹, И. В. Безменов¹, В. А. Емельянов², Г. И. Модестова²,
Е. В. Бурмистров³, В. Н. Тряпицын⁴

¹ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

²Восточно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ», г. Иркутск, Россия

³АО «НПК «СПП», г. Москва, Россия

⁴ФГБУН «КРАО РАН», пос. Научный, Респ. Крым, Россия

Реферат

Лазерная локация космических аппаратов является одним из важных, метрологически прослеживаемых средств фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС. В Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ) имеются два лазерных дальнометра: ММКОС «Сажень-ТМ-БИС» и лазерная станция нового поколения «Точка», связь которых с Государственным специальным эталоном единицы длины и ГЭВЧ позволяет обеспечить прямой метрологический базис проводимых измерений. Однако, с появлением и развитием глобальных навигационных систем, интерферометрии со сверхдлинными базами, совершенствованием системы DORIS доля лазерно-локационных измерений во всем массиве получаемых данных существенно уменьшилась. Тем не менее, на сегодняшний день SLR является одним из наиболее высокоточных средств измерений для данной области, что и предопределяет её активное использование и развитие. В последнее время обращалось внимание и на то обстоятельство, что имеющиеся технологии не заменяют, а только взаимно дополняют друг друга. Кроме того, растут и требования специальных потребителей в части точности моделей гравитационного поля Земли, координат полюса, масштабов, уровня океана и направления местной вертикали в различных его точках. Данное обстоятельство требует непрерывного совершенствования средств и методов с целью удовлетворения современным требованиям.

Для получения несмещенных оценок, станции лазерной локации проходят процедуру калибровки. Накопленный опыт, внедрение новых методов калибровки в процессе проведения сеансов наблюдений, способов и алгоритмов обработки позволяет повысить точность получаемых результатов, в том числе и в условиях, неблагоприятных для проведения наблюдений. На основе проведенных экспериментов разработаны методы проведения измерений и обработки получаемых результатов с целью сличения шкал времени средствами лазерной локации.

Достигнутые результаты позволяют говорить о новых возможностях как в части сличения удаленных шкал времени, так и в организации новых направлений исследований.

Ключевые слова: лазерный дальнометр, параметры вращения Земли, калибровка, сличение шкал времени.

Контакты для связи: Игнатенко Игорь Юрьевич (igig@vniiftri.ru).

Для цитирования: Игнатенко И. Ю., Безменов И. В., Емельянов В. А., Модестова Г. И., Бурмистров Е. В., Тряпицын В. Н. Совершенствование средств и методов лазерной спутниковой дальнометрии // Труды ИПА РАН. 2025. Вып. 74. С. 30–36.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.74.30-36>

Improvement of the Laser Satellite Ranging Means and Methods

I. Yu. Ignatenko¹, I. V. Bezmenov¹, V. A. Emelyanov², G. I. Modestova²,
E. V. Burmistrov³, V. N. Tryapitsyn⁴

¹FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow reg., Russia

²East-Siberian Branch of FSUE «VNIIFTRI», Irkutsk, Russia

³JC «RPC «PSI», Moscow, Russia

⁴Crimean astrophysical observatory, p. Nauchny, Crimea, Russia

Abstract

Spacecraft laser ranging is one of the important, metrologically traceable fundamental support method for the GLONASS system. The Main Metrology Center of the State Service for Time, Frequency and Earth Rotation Parameters Determination (GSVCh MMC) operates two laser ranging systems: MMKOS “Sazhen-TM-BIS” and the new generation laser station “Tochka”. Their connection with the State Special Standard for the Length Unit and the Time and Frequency State Standard provides a direct metrological basis for measurements. However, with the advent and development of global navigation systems, VLBI, and the improvements in the DORIS system, the proportion of laser ranging measurements in the overall data set has significantly decreased. Nevertheless, SLR remains one of the most precise measurement tools in this field, which ensures its continued active use and development. Recently, it has been recognized that existing technologies do not replace but rather complement each other. Furthermore, the demands of specialized users for

increased accuracy in Earth's gravity field models, pole coordinates, scales, sea level, and the direction of the local vertical at various points are growing. This necessitates ongoing enhancement of tools and methods to meet modern requirements.

To obtain unbiased estimates, laser ranging stations undergo a calibration procedure. The accumulated experience, along with the introduction of new calibration methods during observation sessions, as well as processing methods and algorithms, allow to increase the obtained results accuracy — even under unfavorable observations conditions. Based on the experiments, measurement and processing methods have been developed in order to compare time scales using laser ranging.

The achieved results open new opportunities for comparing remote time scales and for initiating new research areas.

Keywords: laser rangefinder, Earth rotation parameters, spacecraft, calibration, time scales comparison.

Contacts: Igor Yu. Ignatenko (igig@vniiftri.ru).

For citation: Ignatenko I. Yu., Bezmenov I. V., Emelyanov V. A., Modestova G. I., Burmistrov E. V., Tryapitsyn V. N. Improvement of the laser satellite ranging means and methods // Transactions of IAA RAS. 2025. Vol. 74. P. 30–36.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.74.30-36>

Лазерная локация космических аппаратов — одно из важных средств фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС, метрологически прослеживаемых и опирающихся непосредственно на основные единицы системы СИ (метр и секунда). В Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ) имеются два типа лазерных дальномеров: ММКОС «Сажень-ТМ-БИС» (Ignatenko, 2020; Emelyanov, 2020) и лазерные станции комплекса средств фундаментального обеспечения (ЛС КСФО) нового поколения

(рис. 1–2), расположенные в Иркутске и Менделеево.

Наблюдения на станциях позволяют как решать прямые задачи, поставленные при вводе дальномеров в эксплуатацию (определение параметров вращения Земли, уточнение параметров орбит спутников ГЛОНАСС и т. д.), так и обеспечивать проведение ряда экспериментов.

На ММКОС «Сажень-ТМ-БИС» в Менделеево установлены бленды для уменьшения влияния фоновой засветки и, соответственно, для улучшения отношения сигнал/помеха, а также для более



Рис. 1. ММКОС «Сажень-БИС» в Менделеево



Рис. 2. ЛС КСФО в Иркутске

контрастного отображения слабо светящихся объектов (лоцируемых аппаратов, опорных звезд). Для защиты от росы и обмерзания смонтирован подогрев оптических поверхностей. Эти элементы способствуют уменьшению количества аномальных измерений и повышению производительности

станции. Связь станций с Государственным специальным эталоном единицы длины и Государственным эталоном времени и частоты позволяет обеспечить прямой метрологический базис проводимых измерений ([Ignatenko, 2012](#)).

Полную погрешность лазерно-локационной системы можно разделить на две составляющие: инструментальную и полученную методом измерений ([Игнатенко, Жестков, 2012](#)). Принцип построения перечня измеряемых и контролируемых параметров и погрешностей может быть основан на выделении аддитивных факторов, влияющих на каждую составляющую. Это позволяет, с одной стороны, свести весьма большое (и часто неопределенное) число элементарных погрешностей к ограниченному числу влияющих величин. Отвлекаясь от физических причин возникновения и изменения погрешностей, достаточно рассматривать лишь динамику вариаций влияющих величин, т. е. формализовать и упорядочить математическую модель измерений. С другой стороны, выделение влияющих величин позволяет корректно задать нормируемые метрологические характеристики. Для получения несмещенных оценок важно обеспечить исключение систематической погрешности. С этой целью проводится процедура калибровки станции лазерной локации ([Игнатенко и др., 2023](#)). Калибровка и контроль метрологических характеристик осуществляется:

- штатными средствами спутникового лазерного дальномера — в процессе сеанса измерений;
- средствами из состава Государственного специального эталона длины — периодическая: контроль аддитивной составляющей погрешности;
- средствами из состава Государственного эталона времени и частоты — периодическая: контроль мультипликативной составляющей погрешности измерения дальности и погрешности привязки момента измерений к национальной шкале времени UTC(SU).

Контроль систематической составляющей погрешности привязки к национальной шкале времени и калибровка КОС осуществляются с привлечением как измерительного базиса, так и средств измерения времени и частоты. Уровень принимаемого сигнала при калибровке и контроле метрологических характеристик устанавливается равным сигналу, получаемому со спутников «Лагеос» при средних значениях прозрачности атмосферы в пункте наблюдений.

Контрольный базис строится как дистанция между нуль-пунктом дальномера и геодезическим опорным пунктом, расположенным на расстоянии 30...100 м от КОС. Геодезический опорный пункт должен быть снабжен средствами принудительной центровки и средствами однозначной установки приборов. Рабочая точка установленных приборов должна находиться в горизонте (или с небольшим превышением).

Сличение КОС производится при помощи эталона сравнения и осуществляется в несколько этапов. Принимаемый полезный сигнал, отраженный от космического аппарата, представляет собой

единичные фотоны, и для правильного функционирования узлов временной привязки аппаратуры измерителя интервалов времени калибровочный сигнал должен быть ослаблен до этих же величин. Это можно осуществить путем подбора нейтральных светофильтров в оптическом тракте при использовании многоканального амплитудного анализатора, включенного в тракт приема отраженного сигнала. Кроме того, анализатор позволяет проводить точную настройку и контроль фотоприемника отраженного сигнала с целью минимизации его шумов и нестабильности времени задержки при максимально возможном при этих условиях квантовом выходе, что позволяет уменьшить как неконтролируемые систематические ошибки, так и случайные составляющие погрешности системы в целом. Длина опорного базиса измеряется при помощи эталона сравнения от геодезического опорного пункта до отражателя с внесением необходимых поправок. Опорно-поворотное устройство КОС наводится на базисный пункт и измерения проводятся непосредственно через апертуру телескопа. Для этого непосредственно в нуль-пункт КОС или в тракт распространения оптического сигнала на известном и контролируемом расстоянии помещается дополнительный отражатель. Дополнительные места размещения отражателя (при возможности) расположены непосредственно возле стартового и стопового фотоприемников с аналогичным контролем этих расстояний. Следующей операцией является перенос отражателя на место эталона сравнения. При этом конструкция установки должна обеспечивать однозначное соответствие базовой точки эталона сравнения и отражателя при их перестановке. После чего производятся измерения установленной базисной дистанции при помощи КОС. По результатам измерений определяется аддитивная поправка КОС.

При проведении работ по калибровке КОС необходимо контролировать метеопараметры на концах базовой линии. Это необходимо для вычисления атмосферной поправки при проведении измерений на базисе. Периодический контроль проводится не менее четырех раз в год, в условиях, характерных для каждого сезона по ГОСТ 16350-80.

Функционирование станции и получение результатов надлежащего качества обеспечивается как за счет методов и средств, работающих в реальном времени, непосредственно во время проведения сеанса наблюдений, так и за счет средств постобработки.

К реализованным методам реального времени следует отнести:

- метод адаптивного обнаружения слабых оптических сигналов на основе плотности распределения вероятности их регистрации в приемном физическом строге дальности ([Бурмистров, 2008](#));

— метод расширения одноэлектронного режима работы при применении амплитудной селекции сигнальных импульсов;

— методы экстремального регулирования в процессе сеанса лазерной дальнометрии по уровню отраженного сигнала;

— звездную калибровку угловой исполнительной системы, в том числе периодической составляющей ошибки угловых датчиков исполнительных осей ([Бурмистров, 2010](#));

— калибровку аппаратурной поправки «в сеансе» лазерной дальнометрии;

— метод измерения диаграммы лазерного излучения в зоне лоцируемого КА ([Бурмистров и др., 2021](#)).

Накопленный опыт ([Емельянов и др., 2016](#)), в том числе и участие в экспериментальных работах ([Владимиров и др., 2017](#)), постоянное развитие

средств и методов наблюдений ([Емельянов и др., 2021](#)), внедрение новых методов калибровки в процессе проведения сеансов наблюдений — все это позволило достичь хороших результатов относительно станций мировой лазерной сети. Несмотря на посредственные технические параметры изделия «Сажень-ТМ», станция «Менделеево 1874», например, превосходит по качеству результатов работы практически все станции мировой сети, в том числе и станции, имеющие изначально более высокие характеристики и лучшие условия наблюдения.

Усредненные за несколько лет значения погрешности (range bias, RB) для некоторых КА, полученные по данным выборочных станций сети International Laser Ranging Service (ILRS), представлены на рис. 3–5 ([Rodriguez, 2018](#)).

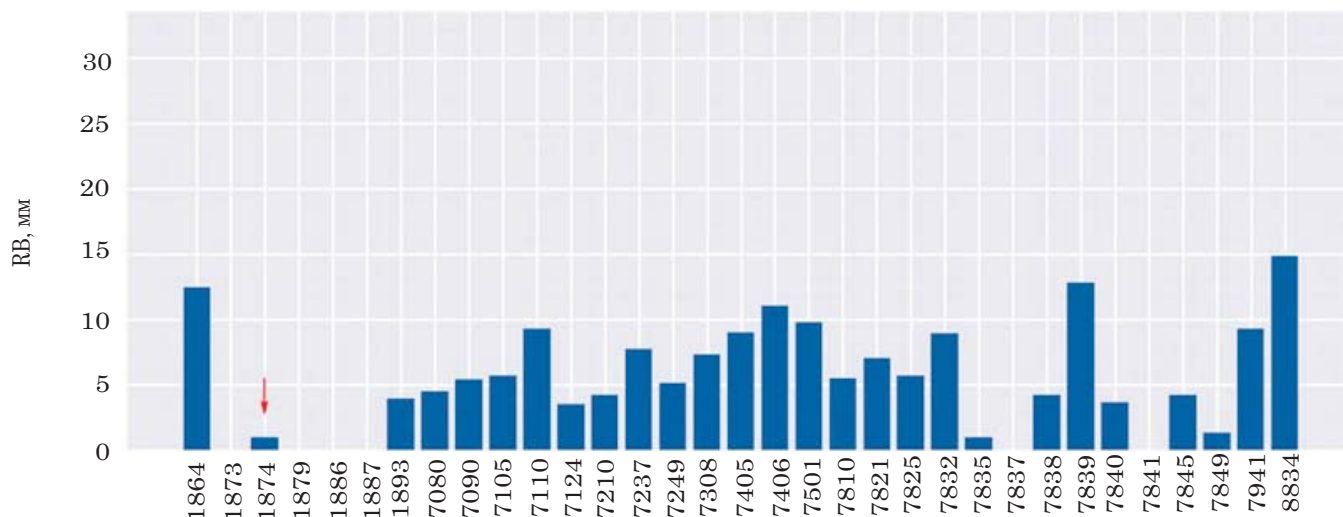


Рис. 3. Погрешности лазерных станций сети ILRS для спутника ETALON

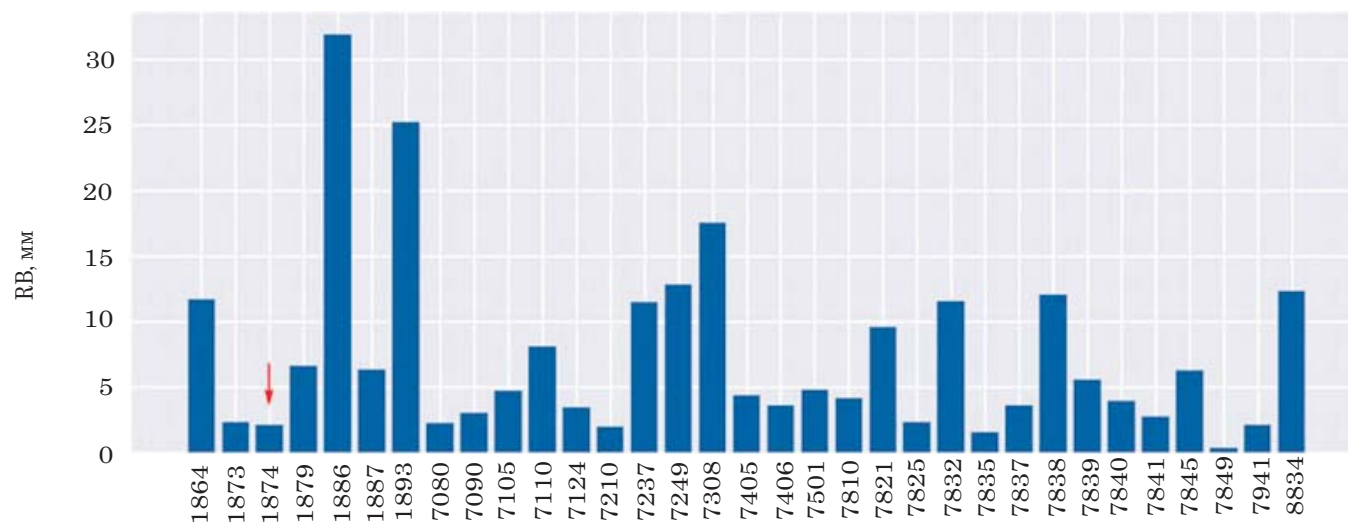


Рис. 4. Погрешности лазерных станций сети ILRS для спутника LAGEOS-1

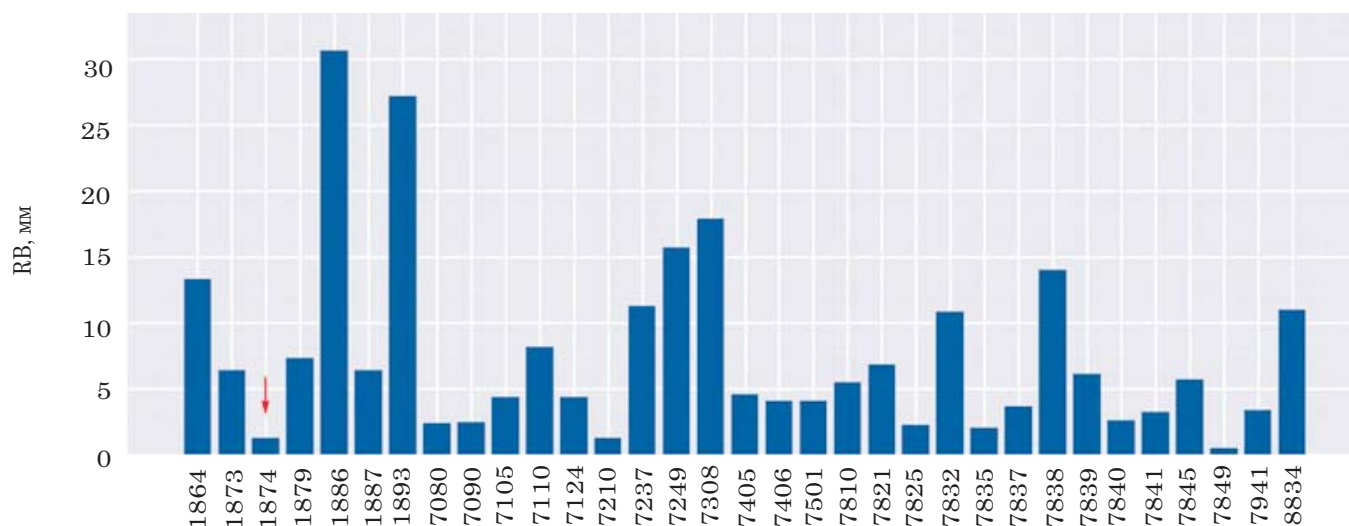


Рис. 5. Погрешности лазерных станций сети ILRS для спутника LAGEOS-2

Величина погрешности лазерного дальномера RB включает в себя различные погрешности лазерного дальномера, часов, погрешности определения метеопараметров, задержек в системе и др. Определение координат и величин RB для всех задействованных станций ведет к высокой корреляции между этими величинами, а значит, и к ослаблению всей системы нормальных уравнений. Рабочей группой анализа ILRS разработаны рекомендации по определению величин RB для конкретных станций. (Otsubo et al., 2015) Вопрос сходимости этих оценок в значительной степени зависит от точности лазерных наблюдений и вида аппроксимирующей функции. Очевидно, что однозначного решения данной задачи нет, поскольку, например, само понятие грубого измерения или выбросов не определено однозначно.

Для разрешения этой проблемы были разработаны подход (Безменов и др., 2022) и алгоритмы обработки (Bezmenov, 2021), основанные на применении метода, который базируется на понятии оптимального решения и на алгоритме поиска тренда с помощью так называемых минимизирующих наборов. Применение данного подхода при постобработке (Игнатенко, Безменов, 2023) позволило получать устойчивые результаты, в том числе в условиях неблагоприятных для наблюдений в части отличия текущего состояния атмосферы от принятой в модели. (Игнатенко и др., 2018, С. 247). Данный подход обеспечивает получение робастной оценки аппроксимирующей функции при минимальном количестве выбракованных измерений. Это, в свою очередь, обеспечивает осреднение большого числа «сырых» измерений при построении «нормальных точек». Особенно актуальным это обстоятельство является для систем замкнутого цикла, когда темп измерений ограничен временем распространения импульсов до КА и обратно (Triapysyn, Makeev, 2018). Кроме того, смена по-

колений техники, улучшение параметров станций мировой сети существенно изменили требования к точности измерений. Предложенные методы позволяют оставаться на современном уровне в том числе и станциям с относительно невысокими техническими характеристиками.

Аналогичным образом проблема подбора аппроксимирующей функции возникает и при проведении сличений удаленных шкал времени методами лазерной локации (Ignatenko et al., 2004). Величины измеренной дальности до космического аппарата и определяемая величина расхождения шкал земля — борт оказываются корреляционно связанными. Чем лучше подобрана аппроксимирующая функция, тем быстрее сходится решение (Игнатенко, 2016), учитывающее различные влияющие факторы. Экспериментальная проверка (Игнатенко и др., 2016) и дальнейшее развитие средств и методов сличения удаленных шкал времени (Игнатенко и др., 2018, С. 51–56) показали правильность данного подхода.

Проведенный анализ достигнутых результатов позволяет говорить о новых возможностях как в части сличения удаленных шкал времени (Донченко и др., 2023), так и в реализации новых направлений исследований (Фатеев, Игнатенко, 2022).

Литература

Безменов И. В., Игнатенко И. Ю., Пасынок С. Л. Новые методы достижения перспективного уровня точности координатно-временных измерений. Труды ИПА РАН. 2022. № 60. С. 12–20.

Бурмистров Е. В. Методика и алгоритм обнаружения слабых оптических сигналов в дневных условиях при лазерной дальнометрии с высокой частотой повторения импульсов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2008. Т. 13, № 4. С. 34–43.

Бурмистров Е. В. Ускоренная калибровка периодики угловых датчиков мобильной квантово-оптической

системы // Обзорение прикладной и промышленной математики. 2010. Т. 17, Вып. 6. С. 857–858.

Бурмистров Е. В., Елантьев И. А., Кононаева С. А., Муркин А. О. Метод натурных измерений профиля интенсивности излучения в зоне космического аппарата для спутникового лазерного дальномера наземного базирования // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 58. С. 11–16.

Владимиров В. М., Модестова Г. И., Емельянов В. А. и др. Опыт наблюдения малого КА «М. Решетнев» на лазерной станции в Иркутске // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 42. С. 72–78.

Донченко С. И., Карутин С. Н., Игнатенко И. Ю. и др. Обеспечение критически важных потребителей ГЛОНАСС шкалой времени Государственного эталона с субнаносекундной точностью лазерными средствами ЛС КСФО. В кн.: Метрология времени и пространства. Материалы XI Международного симпозиума. Менделеево, 2023. С. 7–8.

Емельянов В. А., Модестова Г. И., Капленко В. В., Игнатенко И. Ю. Опыт эксплуатации лазерной станции в Иркутске // Измерительная техника. 2016. № 3. С. 16–17.

Емельянов В. А., Модестова Г. И., Мясникова Е. Н., Чигвинцев А. А. Развитие средств для определения параметров вращения Земли в Восточно-Сибирском филиале ФГУП «ВНИИФТРИ». Избранные проблемы астрономии: 90-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 2021. С. 50–54.

Игнатенко И. Ю. Сличение удаленных шкал времени на основе методов лазерной дальнометрии. Альманах современной метрологии. 2016. № 8. С. 148–161.

Игнатенко И. Ю., Безменов И. В. Применение алгоритмов устойчивого оценивания при обработке лазерно-локационных измерений. В книге: Метрология времени и пространства. Материалы XI Международного симпозиума. Менделеево, 2023. С. 98.

Игнатенко И. Ю., Верницкий Д. М., Колычев А. М. Калибровка спутникового лазерного дальномера нового поколения средствами Государственного специального эталона длины. В книге: Метрология времени и пространства. Материалы XI Международного симпозиума. Менделеево, 2023. С. 169.

Игнатенко И. Ю., Жестков А. Г. Метрологическое обеспечение лазерно-локационных измерений. В сборнике // Метрология времени и пространства. Материалы 6-го Международного симпозиума. 2012. С. 281–282.

Игнатенко И. Ю., Тряпцын В. Н., Игнатенко Ю. В. Метод определения разности шкал времени бортовых часов ИСЗ и станции лазерной локации. Труды ИПА РАН. 2018. № 45. С. 51–56.

Игнатенко И. Ю., Шлегель В. Р., Жестков А. Г. Метрологические аспекты и неустойчивые факторы, влияющие на результаты лазерно-локационных измерений. В книге: Метрология времени и пространства. Материалы IX Международного симпозиума. 2018. С. 247.

Игнатенко И. Ю., Шлегель В. Р., Жестков А. Г. и др. Эксперименты по передаче шкалы времени Государственного эталона средствами лазерной локации. В сб.: Метрология времени и пространства. Материалы VIII Международного симпозиума. 2016. С. 102.

Фатеев В. Ф., Игнатенко И. Ю. О возможности измерения параметров гравитационного поля Земли с помощью квантово-оптических систем. Альманах современной метрологии. 2022. № 1 (29). С. 106–114.

Bezmenov I. V. Effective algorithms for detection outliers and cycle slip repair in GNSS data measurements. Chapter 9 in the book “Satellite Systems: Design, Modeling, Simulation and Analysis”. Ed. by Tien M. Nguyen. IntechOpen. London. UK. 2021. P. 177–209.

Emelyanov V. A. Irkutsk, Russia. In: Section 8 ILRS Network of International Laser Ranging Service (ILRS) 2016–2019 Report. Ed. by Noll C. and Pearlman M. NASA/TP-20205008530, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA, 2020. P. 8–47–8–48.

Ignatenko I. Yu. Mendeleevo, Russia. In: Section 8 ILRS Network of International Laser Ranging Service (ILRS) 2016–2019 Report. Ed. by Noll C. and Pearlman M. NASA/TP-20205008530, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA, 2020. P. 8–66–8–68.

Ignatenko I. Yu. Method of comparison laser locator with standard of length // Mitteilungen des Bundesamtes fuer Kartographie und Geodäsie. Frankfurt, 2012. Vol. 48. 423 pages.

Ignatenko I. Yu., Tryapitsyn V. M., Ignatenko Yu. V. Comparison of timing devices on the Earth and the satellite by laser ranging method // Journal of Automation and Information Sciences. 2004. Vol. 36, no. 6. P. 44–49.

Otsubo T., Sherwood R. A., Appleby G. M., et al. Center-of-mass corrections for sub-cm-precision laser-ranging targets: Starlette, Stella and LARES // Journal of Geodesy. 2015. Vol. 89. P. 303–312. URL: <https://doi.org/10.1007/s00190-014-0776-y> (дата обращения 05.08.2025).

Rodríguez J., Appleby G., Otsubo T. Updated centre of mass correction tables for LAGEOS, Etalon, LARES, Starlette and Ajisai // 21st International Workshop on Laser Ranging. Canberra, Australia, November 4–9, 2018.

Triapitsyn V. N., Makeev A. A. Satellite laser ranging at station 1893 (Katzively) in 2017 // 21st International Workshop on Laser Ranging. Canberra, Australia, November 04–09, 2018.